

Geoquímica ambiental, una aplicación en suelos contaminados por metales pesados

Jesús M. López-Kramer ⁽¹⁾, Efrén J. Jaimez-Salgado ⁽¹⁾, José L. Cuevas-Ojeda ⁽²⁾ y Bárbara Polo-González ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212, No. 2906 e/ 29 y 31, Reparto La Coronela, La Lisa, Ciudad de la Habana, Cuba. CP 11600. Email: kramer@iga.cu, ejaimenz@iga.cu

⁽²⁾ CENAI. Calle 212, No. 2906 e/ 29 y 31, Reparto La Coronela, La Lisa, Ciudad de la Habana, Cuba. Email: jlcuevas@cenais.cu

Recibido: julio 7, 2014	Aceptado: junio 30, 2015
-------------------------	--------------------------

Resumen

El análisis geoquímico ambiental aplicado a muestras de suelos con énfasis en la efectividad de la representación y tratamiento geoestadísticos de los datos permitió conocer el comportamiento de los metales dentro y fuera de los límites de la Empresa seleccionada como caso de estudio. La aplicación de software dio la posibilidad de conformar las aureolas secundarias. El método de superposición de las isolíneas de contenidos de los diferentes metales e imágenes seleccionadas permitió obtener el producto final en el que se delimitan los escenarios de peligro. Los resultados obtenidos se comparan con los límites permisibles para metales tóxicos en suelos. Las corrientes superficiales intermitentes de dirección N-S y la geomorfología del terreno constituyen las vías que podrían facilitar el transporte de la contaminación por los metales pesados del vertedero. Todo esto permite planificar una red de monitoreo y proponer un plan de medidas preventivas en las aguas y correctivas en los suelos.

Palabras clave: Suelos, contaminación, escenarios de peligro, Geoquímica Ambiental

Environmental geochemistry, an application in heavy metals soils contaminated

Abstract

The geochemical environmental analysis applied to soil samples contaminated by metals makes emphasis in the effectiveness of the representation and geostatistical treatment of the data in the process of interpretation. Results are compared with the permissible limits for toxic metals in soils. The application of different software gave the possibility to carry out the conformation of the secondary aureoles. The overlapping method of isolines of the different metals and selected images was used to evaluate the relationship between the relief, the isolines and the dispersion of the studied metals. As final product is defined the scenarios of danger. The digital bases of the maps were used SIG. The net of drainage was obtained properly through the interpretation of the satelital image georefereds. Of these, the principal flow direction is obtained E-W and the same ones constitute the ways that could facilitate the contamination transport of the heavy metals toward the area. This entire one allows to plan a monitoring net and to propose a plan of preventive measures in the waters and correctives in soils.

Keywords: contaminated soil, metals, geochemical environmental

1. Introducción

Es común que fijemos la atención sobre los impactos ambientales más evidentes (impacto visual) provocados por diversas actividades productivas y olvidamos los aspectos mineralógicos y químicos que se derivan de dicha actividad. Muchos minerales son solubles bajo determinadas condiciones físico-químicas que al variar se produce la introducción de estos metales o sales al ciclo exógeno. Por otra parte, la actividad antrópica también provoca la incorporación artificial de metales al ciclo exógeno a partir de restos de los pasivos ambientales, por tal motivo, en el trabajo se abordan aspectos básicos referidos a la geoquímica ambiental.

1.1 Antecedentes

Vinculados al tema de la geoquímica y el procesamiento de los datos en general se han desarrollado trabajos asociados con la actividad minera, la calidad de las aguas y la contaminación industrial al aire, agua y suelos. A modo de ejemplo, entre los trabajos generales citamos a Campos *et al.* (1998), Toujague-de-la-Rosa (2001), López-Kramer *et al.* (2006a, 2006b), Molerio *et al.* (1992) y Rocamora *et al.* (2009), y otros que identifican y caracterizan las fuentes contaminantes con énfasis en el análisis estadístico hidrogeoquímico.

Trabajos desarrollados por Olivares y De la Rosa (2006), en la planta Electroquímica de Sagua Cloro Sosa, en la que se estudia la contaminación por mercurio dentro de la planta y la posible migración de este elemento al río Sagua la Chica. Otros trabajos de este colectivo se destaca en Olivares y De la Rosa (2009) el estudio de la contaminación por metales en el área de influencia del vertedero de calle 100. En ambos casos, estos autores profundizan en la aplicación de una metodología, el tratamiento químico-estadístico de las muestras y los análisis, quedando subyacente la interpretación-vinculación de estos con los factores del medio físico.

Otro trabajo interesante, desde el punto de vista de cómo solucionar los pasivos ambientales lo tenemos en Quintana-Puchol *et al.* (2009). En el mismo caracterizan los residuales catalíticos envenenados desechados en la producción de H_2SO_4 de la planta Rayonitro. Es interesante la propuesta de cómo eliminar estos pasivos ambientales, obteniendo ferroaleaciones de vanadio útiles para el desarrollo de consumibles de soldadura y su tratamiento para obtener materias primas para diversas industrias.

En el 2008 a solicitud de la Delegación Provincial del CITMA de La Habana se desarrollaron investigaciones en áreas urbanizadas de la ciudad de La Habana, con contaminación de plomo. En este trabajo, detectan niveles de contaminación críticos, con daños en la salud de los habitantes locales. De acuerdo a los resultados obtenidos y la distribución en suelos y sedimentos de fondo del río, se proyectaron soluciones de ingeniería, basadas en barreras físicas de inmovilidad de los residuales, después de los trabajos de demoliciones, limpieza y recogida de suelos y escombros. Aún se mantienen monitoreos y controles en al área.

En específico, los principales trabajos dentro del área de estudio lo constituyen temas de investigación, entre los que se destacan; Correa *et al.* (1998), en el que desarrollan el diagnóstico ambiental integral del Municipio Arroyo Naranjo. En Pedroso *et al.* (2005a, 2005, 2007a; 2007b) se detallan los resultados obtenidos en la correlación de los parámetros magnéticos con las concentraciones de metales obtenidas por métodos geoquímicos, describiendo la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas por la actividad industrial y el desarrollo vial en la Cuenca Almendares Vento. Este importante trabajo aporta una nueva metodología. Se toman 2 muestras de suelo dentro de la Planta, sin presentar la ubicación de las mismas.

Entre los servicios científicos técnicos, en Cuevas-Ojeda *et al.* (2009; 2011) se hace la actualización del Diagnóstico a la Cuenca Almendares - Vento, presentando el inventario de las fuentes contaminantes de la región, los autores incluyen a la Planta como una de las posibles fuentes directas de contaminación a la subcuenca que alimenta la Presa Ejército Rebelde.

En Rodríguez *et al.* (2011), valoran la afectación de la contaminación metálica en los suelos de un sector comprendido en el exterior de la Empresa. Se aplican técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el Complejo Redox (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica). Las líneas de medición se trazaron transversales a los límites perimetrales de la industria y se extienden hacia el exterior con distancia límite variable, siendo el paso de observación de 25 m. Los trabajos topográficos desarrollados con el objetivo de asegurar el trazado de línea para los trabajos geoquímico-geofísicos del Complejo Redox, tienen una red de 50 x 25 m. Como resultado de este trabajo se calcularon los Límites Contaminantes y se determinaron las magnitudes de la correlación de los atributos con los datos de análisis de laboratorio (Mn, Cd, Pb y Zn). Se concluyó que los elementos químicos más importantes son: Manganeso y Cadmio.

2. Materiales y métodos

El área de estudio se tomó considerándose la existencia de una empresa productora de equipos varios y su cercanía a un grupo de instalaciones de interés económico y social. El vertimiento de desechos en los alrededores de la empresa data de los años 1970.

Durante el levantamiento general, con el objetivo de conocer la posible dinámica de las aguas superficiales y el posible nivel de contaminación en la laguna de oxidación, cantera abandonada (con agua) y varios puntos en el interior de la planta, se tomaron muestras de agua. En estas no se detectó contaminación. La existencia de una antigua cantera abandonada en las inmediaciones del área de estudio que permanece parcialmente con agua y la vegetación a su alrededor es exuberante. Los datos de la muestra tomada de la cantera en 2010, indican que el origen de esa agua es probablemente pluvial. Este tema se propone sea estudiado con mayor profundidad en trabajos futuros.

Los resultados obtenidos en suelos se comparan tanto con los límites permisibles nacionales, como también con los límites internacionales establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la Comunidad Económica Europea, CEE y otras normas internacionales. La medición de parámetros físico-químicos, tales como el pH, acidez de cambio, bases cambiables, capacidad catiónica cambiante, fórmula completa, etc., en la solución de suelos permitió conocer acerca de la calidad de los suelos.

2.1 Materiales Empleados

Para el desarrollo del trabajo se consultaron resultados de proyectos, publicaciones, las hojas cartográficas que cubren el área a escala 1: 50 000.

La información de los resultados de laboratorio y la utilización de diversos "software" permitieron la conformación de las aureolas secundarias geoquímicas para los elementos Cd, Pb, Hg, As, Cu, Mn, Zn, Ni y los valores máximos y mínimos establecidos por la norma antes mencionada.

Fue realizado un muestreo de suelos y aguas en el área (Junio 2010) para conocer el comportamiento actual de los elementos Cd, Pb, Hg, As, Cu, Mn, Zn, Ni. Los métodos de laboratorio, LACEMI ("José Isaac del Corral") utilizados para la determinación de metales pesados y otros elementos altamente tóxicos fueron, en el caso del As y el Hg, el método de ICP por digestión con agua regia inversa y en el caso de los restantes metales, se utilizó el método de ICP por digestión con HCL 2N. Para la determinación de los valores de pH en H₂O y pH en solución de KCL a 25° C, se utilizó el método de electrometría con límites de 0,1 a 14,0 U.

2.2 Métodos. Método de superposición de mapas

Utilizando las herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se realizó la edición de mapas y la confección de la base de datos partir de la información base. La superposición de los mapas seleccionados permitió evaluar la relación entre el suelo, relieve, isolíneas, la dispersión de los elementos estudiados y posteriormente delimitar los escenarios de peligro.

2.3 Técnicas analíticas. Análisis exploratorio de datos

El análisis estadísticos de los datos utilizando el software "Geoestadística", herramienta reconocida para este tipo de estudios y similares ha sido aplicado en trabajos hidrogeológicos por autores como Molerio (1992), y Toujague-de-la-Rosa (2001).

Para la confección de los planos de isolíneas que representan los diferentes resultados se tuvo en cuenta el tipo de muestreo aplicado y la densidad de la red de muestras. Como estrategia para el muestreo se seleccionaron los puntos (estaciones) que permitieran caracterizar los diferentes tipos de suelos aledaños a la zona de estudio. Como la zona de los trabajos está fuertemente antropizada y contaminada, se seleccionaron al menos 2 puntos de muestreos (blancos) alejados de la zona de influencia.

Las muestras de suelos tomadas en las estaciones de muestreo se corresponden con los diferentes tipos de suelos presentes en el área. En cada estación, de forma experimental se tomaron 2 muestras, una en el horizonte superficial

A₀ y en la capa arable (horizonte A), conforme a la norma cubana NC 37/1999. Los resultados obtenidos muestran una significativa contaminación por metales pesados en la capa vegetal (A₀) con una marcada tendencia a la disminución de la misma en la capa arable (A) y por consiguiente, hacia los horizontes inferiores. Se confeccionaron 2 perfiles, aproximadamente paralelos, separados entre sí unos 500 m.

3. Resultados y discusión

3.1 Escenario geológico y geomorfológico

El relieve está caracterizado por la presencia de llanuras bajas diseccionadas y onduladas así como también pequeñas elevaciones ubicadas hacia el sur en la zona de influencia, como consecuencia de los cambios en la litología y la tectónica. La litología en este sector de la cuenca está representada por una variedad de rocas calcáreas margosas, poco carsificadas, lo que disminuye la infiltración de las aguas superficiales. En la actualización del diagnóstico ambiental de la Cuenca Almendares-Vento, fue determinada esta zona de ubicación del objeto de estudio en una zona más vulnerable a la contaminación por escurrimiento superficial (Cuevas-Ojeda *et al.*, 2009; 2011).

La red fluvial esta poco desarrollada estando representada por cauces estacionales y/o episódicos con dirección S-N, típicos de estructuras geotectónicas lineales. La dirección del movimiento de las aguas pluviales es SE-NW y drenan hacia el área de la cantera abandonada, la laguna de oxidación y posteriormente a la Presa. La erosión laminar o en sábana predomina, por lo que al ocurrir el lavado del suelo, las zonas más bajas del relieve tienden a enriquecerse con los elementos nocivos, producto del escurrimiento superficial.

En el área interior de la Empresa, el drenaje de las aguas superficiales está vinculado con la actividad antrópica, (por las precipitaciones, procesos de limpieza, canales) y propician la propagación de los elementos contaminantes que se generan en la planta hacia afuera. Particularmente intensos se manifiesta la acumulación de pasivos ambientales de metales en el vertedero. Se definen los pasivos ambientales como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones industriales diversas (en la actualidad abandonada o inactiva) y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

3.2 Distribución de los metales pesados en los suelos

La cobertura espacial del muestreo de suelos, abarcó unos 4 km². Se incluyeron muestras de suelos alejadas de la zona de influencia directa presumiblemente no contaminados, estaciones dentro de la zona de influencia directa de la Planta y en el vertedero (presencia visual de restos de materiales metálicos). Los resultados de laboratorio se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Resultados del laboratorio de química para suelos.

Horizonte	ID. Muestra	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	As	Hg	pH en H ₂ O	pH en KCl
		g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	U	U
A ₀	01	3.6	72	2212	40.1	<10	127	<5	<5	8.13	7.79
A	02	3.9	89	2623	39.8	<10	106	<5	<5	8.07	7.83
A ₀	03	5.4	99	6706	50.0	<10	84	<5	<5	8.45	8.51
A	04	4.8	90	5994	44.0	<10	86	<5	<5	8.51	8.57
A ₀	05	5.0	92	4092	71	21.1	138	<5	<5	8.46	8.29
A	06	5.0	91	2527	83	<10	165	<5	<5	8.74	8.43
A ₀	07	6.6	110	3831	117	<10	142	<5	<5	8.62	8.27
A	08	7.3	127	4475	154	<10	158	<5	<5	8.47	7.96
A ₀	09	5.1	135	6530	90	<10	117	<5	<5	8.41	8.35
A	10	4.4	106	5460	80	<10	98	<5	<5	8.69	8.4
A ₀	11	6.8	127	5498	67	51	1184	<5	<5	8.33	8.19
A	12	9.6	152	7064	112	32.1	1193	<5	<5	8.55	7.78
A ₀	13	8.8	115	9563	140	114	1771	<5	<5	8.34	8.16
A	14	7.9	111	5599	139	46.1	920	<5	<5	8.04	8.26
A ₀	15	190	3965	78873	562	668	146156	<5	<5	8.03	8.03
A	16	85	4665	50344	243	1283	85400	<5	<5	8.25	8.64
A ₀	17	32.0	1933	2854	95	822	2254	<5	<5	8.36	8.7
A	18	22.0	1407	1759	64	1029	1998	<5	<5	8.36	8.61
A ₀	19	3.5	351	633	22.58	119	276	<5	<5	8.28	8.51

La figura 1, nos muestra la ubicación de las estaciones de muestreo, así como otros elementos que permiten la ubicación espacial de la zona de estudio y su zona de influencia.

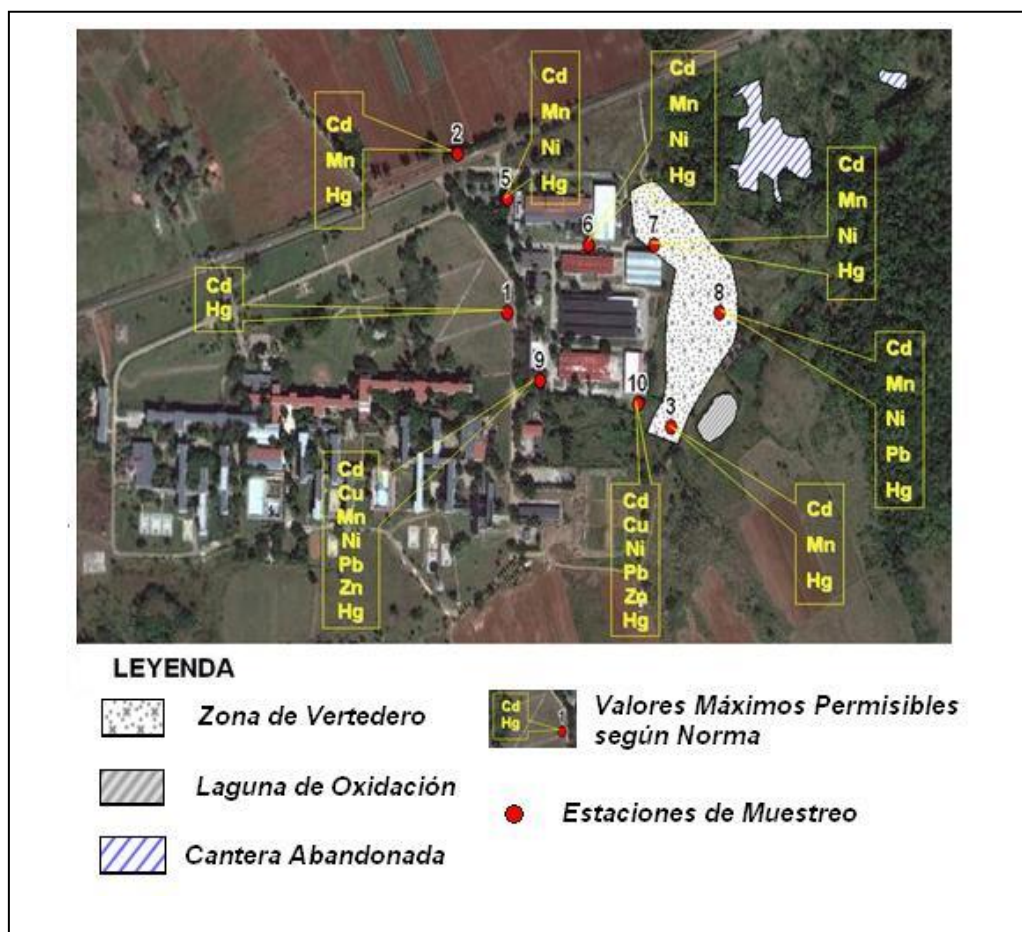


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de muestreo

Evaluación de metales pesados en los suelos vs. Normas

No existe una normativa única a nivel internacional para la delimitación de los límites permisibles de metales pesados en los suelos agrícolas, de tal modo que algunos países como Inglaterra, Alemania, Canadá y los Estados Unidos, poseen sus propios valores umbrales, calculados en base a la investigación de la contaminación de sus suelos a lo largo de décadas, bajo sus propias condiciones ambientales. No obstante, hay una marcada tendencia en la consideración de normas como las de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA-503), así como la Directiva 86/278 de la antigua CEE, las cuales sugieren valores umbrales dentro de rangos cercanos entre sí. No obstante ello, países con una elevada experiencia como los antes mencionados, sugieren valores límites en ocasiones menores, por lo que la valoración final de este problema, requerirá de la pericia del especialista en medio ambiente. La Tabla II, muestra los valores límites permisibles para un grupo importante de metales más As, de acuerdo con las exigencias de la USEPA – 503, de la Directiva de la CEE, y de los reglamentos propios de algunos de los países mencionados.

Tabla II. Concentraciones totales máximas permisibles de metales pesados en la capa arable de suelos del mundo, de acuerdo con diversas normas y reglamentos. (g/t) Fuente: Kabata–Pendias y Adriano (1995)

Elemento	USEPA 503*	CEE**	Inglaterra	Alemania	Canadá
Cd	20	1 – 3	3	1.5	0.8
Cr	1500	100 -150	400	100	110
Cu	750	50 -140	135	60	75
Hg	8	1 – 1.5	1	1	0.4
Ni	210	30 – 75	75	50	18
Pb	150	50 – 300	300	100	54
Zn	1400	100 - 300	300	200	165
As		100			
Mn		3000			

Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio mostrados en la Tabla I, se obtuvo la estadística básica para cada elemento (Tabla III).

Tabla III. Estadística para cada elemento analizado

	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	As	Hg
	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t
Valor máximo	190	4665	78873	562	1283	146156	<5	<5
Valor Mínimo	3.5	72	633	22.5	10	84	<5	<5
Promedio	21.74	728.2	10875.6	116.4	225	12756.4	<5	<5
Mediana	6.6	115	5460	83	21.1	165	<5	<5
Desviación promedio	25.39	953.3	11312.1	69.5	305.4	21688.7	<5	<5
Desviación estándar	44.22	1362.5	19643	119.7	401.3	37696.9	<5	<5

Los valores promedio obtenidos para Cu, Cd, Mn, Ni, Pb y Zn, están por encima de la concentración máxima admisible establecida para metales pesados en la capa arable de suelos del mundo, de acuerdo con diversas normas y reglamentos. La relación de estos valores vs. el promedio obtenido, muestra los siguientes valores: Para el Cadmio 7, Cobre 5, Níquel 1.5, Zinc 42, Plomo 2.5 y Manganese 3.6 veces por encima. Los contenidos de los elementos Mercurio (Hg) no fueron informativos.

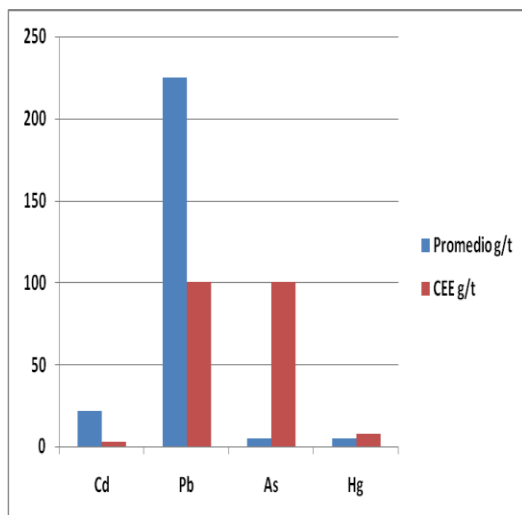


Fig. 2. Valores promedios para los elementos Cd, Pb, As y Hg vs. las concentraciones totales máximas permisibles de metales pesados en la capa arable de suelos mundo, de acuerdo con valores adoptados por la CEE

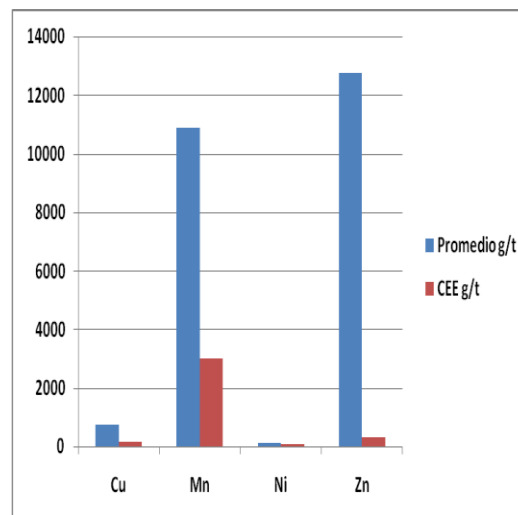


Fig. 3. Valores promedios para los elementos Cu, Mn, Ni y Zn vs. las concentraciones totales máximas permisibles de metales pesados en la capa arable de suelos mundo, de acuerdo con valores adoptados por la CEE

En ambas Figs. 2 y 3, aunque con diferentes escalas se muestra que los valores promedios obtenidos (dentro y fuera de la empresa) para el Cd, Pb, Cu, Mn y Zn, son en todos los casos mayores a los establecidos por la Directiva 86/278 de la CEE.

Evaluación de metales pesados en los horizontes A₀ y A₁

De forma general, los factores que influyen en la migración- concentración de los elementos se encuentran:

- El enriquecimiento en los horizontes con material adsorbente y el carbonato de calcio, en directa correlación con el pH elevado en las soluciones del suelo. En el marco de este proceso un papel importante en la fijación de los elementos químicos en los diferentes horizontes lo tienen los fenómenos de absorción e intercambio de cationes en los minerales arcillosos, en los coloides y sustancias orgánicas, así como la capacidad de los elementos químicos de formar compuestos órgano-metálicos.
- La acumulación de los elementos químicos en los diferentes horizontes de suelo están condicionados por el grado de madurez, alteración o no de los minerales primarios, la inclinación del terreno y otros factores. En el caso de estudio los minerales primarios no son la fuente de los metales, sino la fuente es antrópica.
- La abundancia de óxidos de Mn en estos suelos pudieran facilitar la absorción durante el proceso de migración de algunos metales lo que pudiera ser un factor en la reducción de la movilidad de los metales tóxicos y disminuye el riesgo de la contaminación de las aguas.
- Transporte, de las zonas elevadas y arrastrados por las aguas superficiales, subterráneas, o la red hídrica, depositándose posteriormente donde las condiciones de obstáculos naturales o barreras geoquímicas adecuadas precipitan los minerales y elementos químicos, predominando en estos últimos la fracción fina loam arcillosa, donde los elementos químicos son absorbidos por las arcillas dando como resultado los flujos de dispersión.
- Es una peculiaridad de ser precisamente el Pb, Zn y el Cu los metales que con mayor facilidad extraen las plantas del suelo. El Zn es uno de los metales que más se moviliza en el suelo, superando al Pb y al Cu, presentando además un alto potencial de biodisponibilidad.

En la Tabla I, se muestra el comportamiento de los valores obtenidos en cada estación para los horizontes A₀ y A, estableciéndose la siguiente relación:

Manganeso. El 60% de los valores tomados en el horizonte A son superiores a las tomadas en el horizonte A₀.

Plomo. Los valores (%) para este elemento indican que el 80% de las muestras tomadas en el horizonte A₀ son superiores o iguales a las tomadas en el horizonte A.

Zinc. Los valores (%) para este elemento indican que el 40% de las muestras tomadas en el horizonte A₀ son superiores o iguales a las tomadas en el horizonte A.

Cadmio. Los valores (%) para este elemento indican que el 80% de las muestras tomadas en el horizonte A₀ son superiores o iguales a las tomadas en el horizonte A.

Cobre. El 60% de los valores tomados en el horizonte A son superiores a las tomadas en el horizonte A₀.

Níquel. Los valores (%) para este elemento indican que el 60% de las muestras tomadas en el horizonte A₀ son superiores o iguales a las tomadas en el horizonte A.

As, Hg, Los resultados obtenidos para estos elementos son constantes e iguales para ambos horizontes.

Todo esto nos permite concluir que un elevado por ciento de los metales estudiados se encuentra “in situ”, como consecuencia del pH elevado y la alta *Capacidad de Intercambio Catiónica*, característica de estos suelos. Observándose que en el horizonte A₀ es el que más retiene los metales Pb, Zn, Cd, Ni, mientras que el Mn, Cu, As, Hg, tienden a concentrarse más en el horizonte A, o presentan valores similares como los obtenidos para el As y el Hg.

3.3 Interpretación de las anomalías geoquímicas

Con el objetivo de lograr la representación gráfica de las anomalías geoquímicas de dispersión mono elementales (secundarias) y lograr la interpretación sobre la concentración, dispersión y el transporte de los metales pesados se construyeron los mapas monoelementos. La interpolación se desarrolló mediante “kriging”. Para determinar el valor del fondo y los distintos umbrales anómalos se utiliza el método analítico, la media (fondo) y la desviación estándar:

$$1^{\text{er}} \text{ umbral} = \text{media} + \text{Sd}$$

$$2^{\text{do}} \text{ umbral} = \text{media} + 2\text{Sd}$$

$$3^{\text{er}} \text{ umbral} = \text{media} + 3\text{Sd}$$

Se incluye la isolínea, con la concentración máxima admisible para cada metal pesado en los suelos según la USEPA 503 [tomado de Kabata - Pendias y Adriano (1995)], así como Muñiz (2008). Las isolíneas que se destacan en las Figs. 4, 5 y 6 a diferentes colores, son las obtenidas para el primer, segundo y tercer umbral de cada elemento.

En la Fig. 4, se puede observar la distribución espacial de la concentración química del elemento cadmio en el área objeto de estudio, aquí puede observarse que el área Noroeste que se encuentra por debajo de la isoanómala 3 g/t es un área donde la concentración de este elemento está por debajo de la concentración máxima permisible por norma (ver Tabla III, CEE), observándose además en la zona Este del área de estudio anomalías por encima del 1er. Umbral (66 g/t), 2do. Umbral (110 g/t) y 3er umbral (154 g/t). Queda entonces la mayoría del área donde se encuentran ubicados todos los objetos de la obra civil, esta zona está caracterizada por concentraciones por encima de lo permisible pero por debajo del 1er. Umbral, lo que está significando que esta área tiene un nivel de concentración de este elemento por encima de la norma, pero sin llegar a un primer nivel altamente significativo.

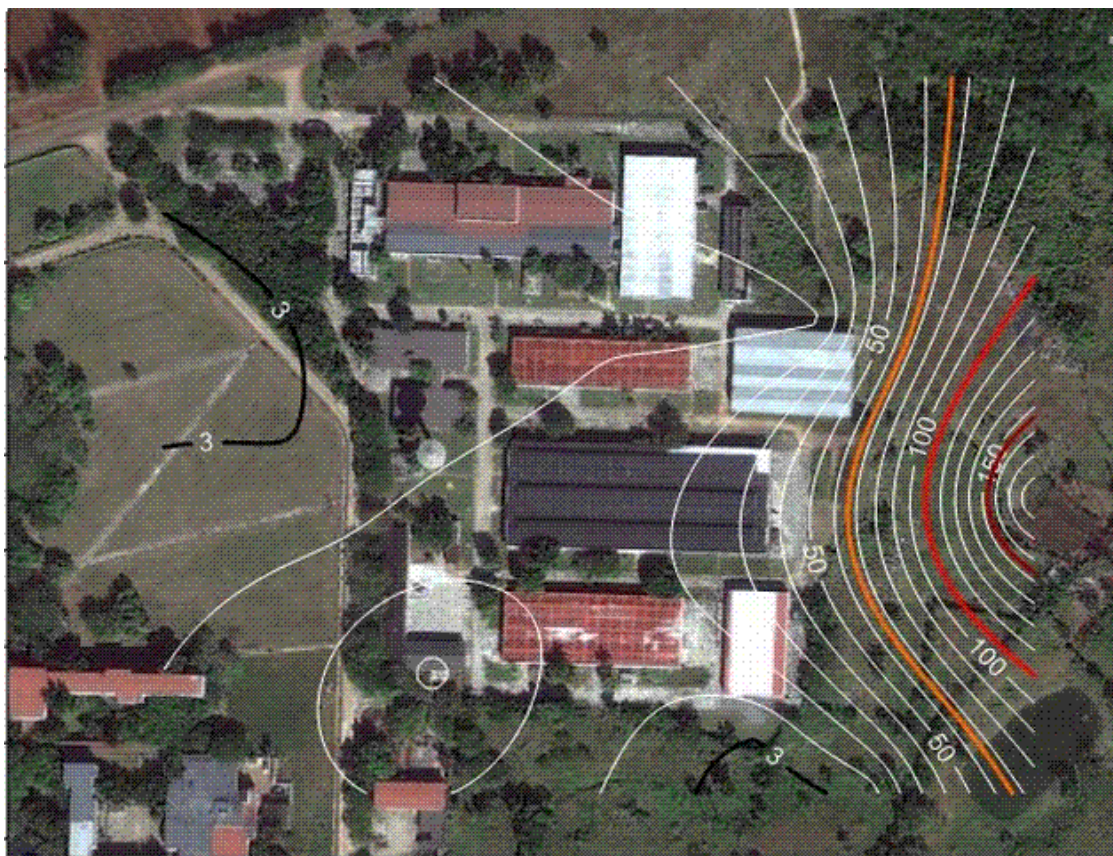


Fig. 4. Distribución espacial de la concentración del elemento Cadmio (Cd) en g/t. Isolínea color negro: Concentración total máxima permisible; color anaranjado: 1er. Umbral; color rojo: 2do. Umbral; color rojo intenso: 3er. Umbral.

Haciendo un análisis similar con la distribución espacial del elemento plomo, que al igual que el cadmio está considerado entre los más dañinos para la salud humana de los que se analizan en la presente investigación.

En la Fig. 5, se puede observar la distribución espacial del plomo, donde se aprecia una diferencia con el caso anterior. La zona de concentración permisible de este elemento es un poco mayor, delimitada por la isoanómala de 300 g/t, dentro de la cual cae aproximadamente el 50% del área de construcción civil. Estando igualmente la zona por encima del 1er. Umbral (626 g/t) y 2do. Umbral (1028 g/t) de concentración en la zona Este del área de estudio coincidente con el área determinada en el anterior caso. Llama la atención una anomalía semi-elíptica en el extremo Suroeste del área con anomalías por encima del 1er. Umbral y que coincide espacialmente con el área de los talleres, donde se han ido acumulando desechos sólidos entre los que se destacan restos de desechos peligrosos como baterías, lo que evidentemente ha contribuido a la contaminación del suelo con el elemento plomo.

En la Fig. 6, se puede observar la distribución espacial de la concentración del elemento zinc, teniendo un carácter similar en el comportamiento de la mayor concentración por encima del 1er. Umbral (50453 g/t) y pasando el 3er. Umbral (125847 g/t) en la zona este del área de estudio. En este caso la zona de concentración permisible del zinc está determinado por la isoanómala 300 g/t, y como puede observarse se encuentra completamente el lado Oeste del área de estudio, donde fundamentalmente se encuentra el área de la Escuela Vocacional "Lenin".

Un análisis similar se realizó con las distribuciones espaciales de la concentración de los demás elementos estudiados cobre, manganeso y níquel. Cabe destacar aunque no se presentan los mapas de distribución espacial de estos elementos que en el caso del cobre existe también una anomalía coincidente con la anomalía semi-elíptica de plomo, aunque en este caso está por encima de la concentración permisible, ella no llega al 1er. Umbral,

determinándose valores entre 1000 - 1800 g/t. Estos tres elementos también alcanzan valores por encima de los tres niveles de umbrales coincidentes todos con la zona Este del área de estudio.

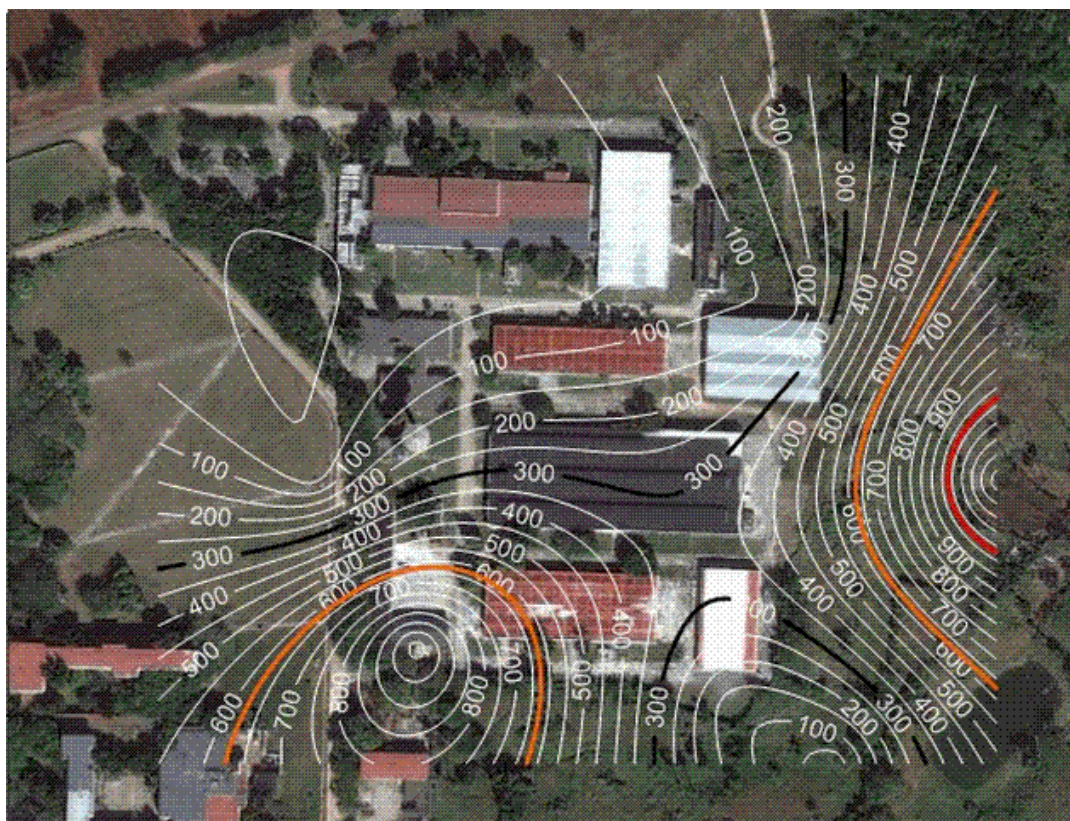


Fig. 5. Distribución espacial de la concentración del elemento Plomo (Pb) en g/t. Isolínea color negro: Concentración total máxima permisible; color anaranjado: 1er. Umbral; color rojo: 2do. Umbral

Haciendo un análisis de interpretación compleja entre todas las distribuciones espaciales de todos los elementos de metales pesados, se determinaron los escenarios de peligros, teniendo en cuenta la zonificación por umbrales de cada uno de los elementos contaminantes.

En la Fig. 7, se puede observar los resultados de la interpretación compleja dando como principal determinación una zonificación de los escenarios de peligros por la contaminación con el conjunto de los metales pesados estudiados. En dicha figura se observa una zona P, donde se determinó que es un área donde hay una concentración permisible de todos los elementos estudiados, se observa una zona C, donde la concentración de la mayoría de los elementos está por encima de lo permisible, sin llegar al 1er. Umbral, lo que habla de que la zona en que se encuentran las construcciones civiles de la Empresa, está en una zona contaminada con valores altos. Se observa además dos zonas 1, en la zona Este, después de los límites de la Empresa y en la zona Suroeste dentro del área de la Empresa, de la que con anterioridad se hizo referencia por los valores anómalos de la concentración de plomo. Estas zonas 1 ya alcanzan valores más altos por encima del 1er. Umbral. También pueden observarse las zonas 2 y 3 que caracterizan a valores extremadamente anómalos de las concentraciones. La zona 1, 2 y 3 (Este), coincide con el vertedero y los niveles de contaminación son como se ha referido extremadamente altos. Como puede apreciarse la extensión de estas zonas contaminadas quedaron abiertas, pudiéndose extender decenas de metros más. Estas zonas coinciden con las acumulaciones de materiales diversos en el vertedero ubicado fuera de la Empresa y que coincide

con la zona de drenaje superficial, cuya dirección es de Oeste-Este y donde el relieve cae unos 10 m, desde la parte Oeste de la Empresa hasta el camino y se incrementa hacia la cantera abandonada.

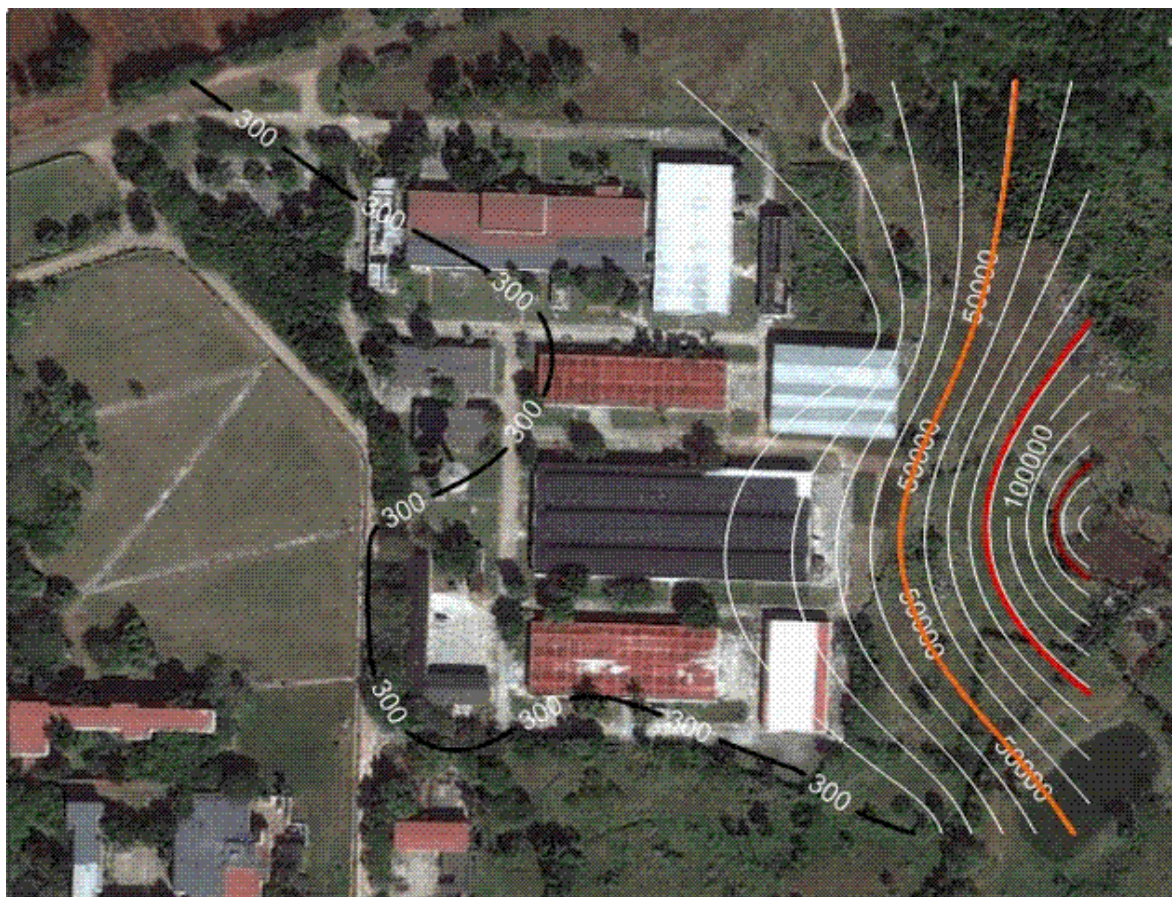


Fig. 6. Distribución espacial de la concentración del elemento Zinc (Zn) en g/t. Isolínea color negro: Concentración total máxima permisible; color anaranjado: 1er. Umbral; color rojo: 2do. Umbral; rojo intenso: 3er. Umbral

Estos resultados obtenidos en la presente investigación fueron comparados con los resultados de la aplicación del complejo redox con los mismos fines de monitoreo de la contaminación por los metales pesados (Rodríguez *et al.*, 2011).

En la Fig. 8 se hizo un montaje de la interpretación de la zonificación de la contaminación por metales pesados determinados en el presente trabajo (ver Fig. 7) y los resultados obtenidos por el complejo redox, para el caso de la distribución espacial de la concentración de plomo, realizada a través de perfiles en el área externa de la Empresa. Como resultado interesante de este ejercicio, puede verse claramente que las zonas 1, 2 y 3 en el extremo Este del área coinciden con los altos valores de las concentraciones de plomo halladas por Rodríguez *et al.* (2011), incluso un máximo menor queda dentro de la zona C de altos contenidos de metales pesados. Una diferencia general es que en el presente trabajo se pudo hacer determinaciones dentro del área de la Empresa y se determinó valores muy altos en la zona elíptica dentro del área de la Empresa, que por el complejo redox, no pudo ser determinado. Estos resultados significan una correspondencia y complementación entre ambas aproximaciones a un mismo problema (Fig. 8).

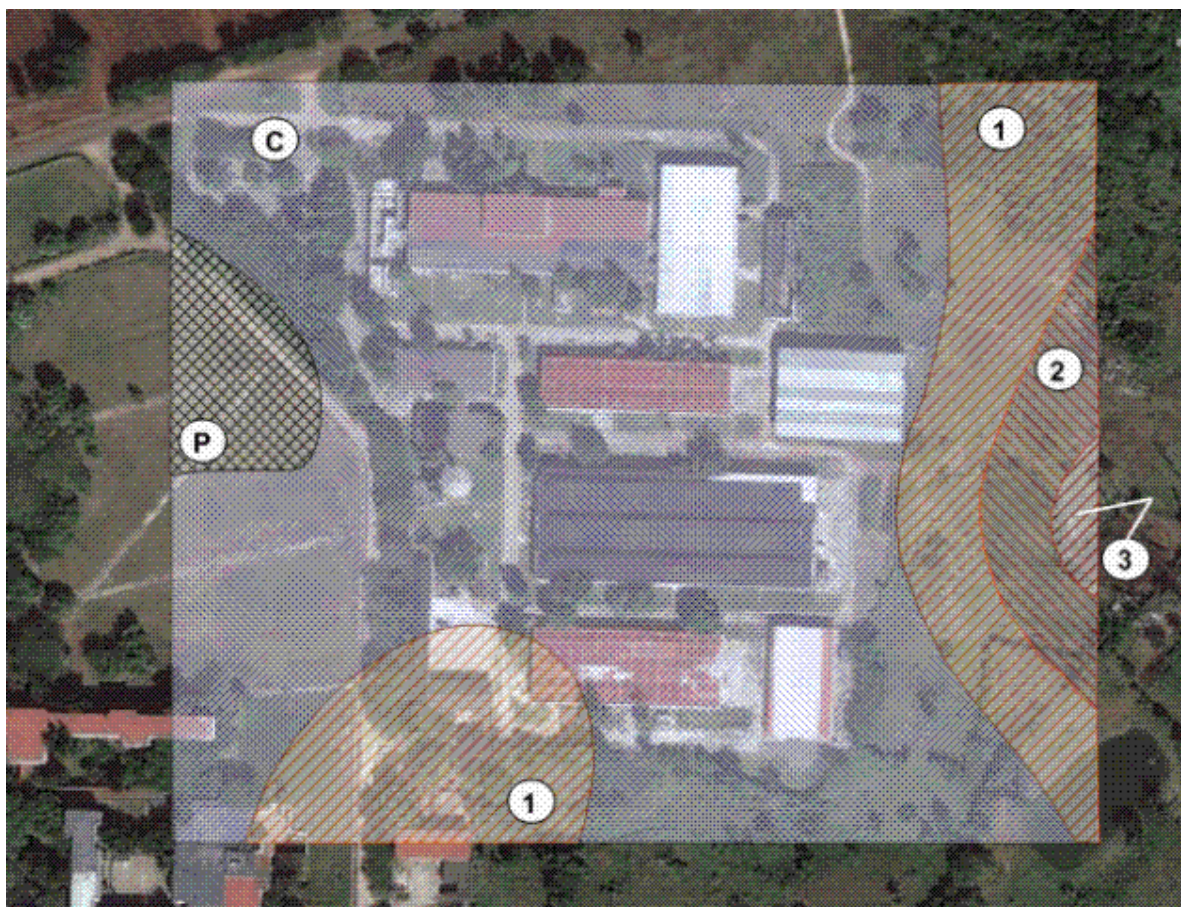


Fig. 7. Zonificación del escenario de peligro por contaminación de metales pesados, según los umbrales anómalos. Zona P: Concentración total máxima permisible; Zona C: Concentración mayor de la permisible; Zona 1: Concentración por encima del 1er. Umbral; Zona 2: Concentración por encima del 2do. Umbral; Zona 3: Concentración por encima del 3er. Umbral.

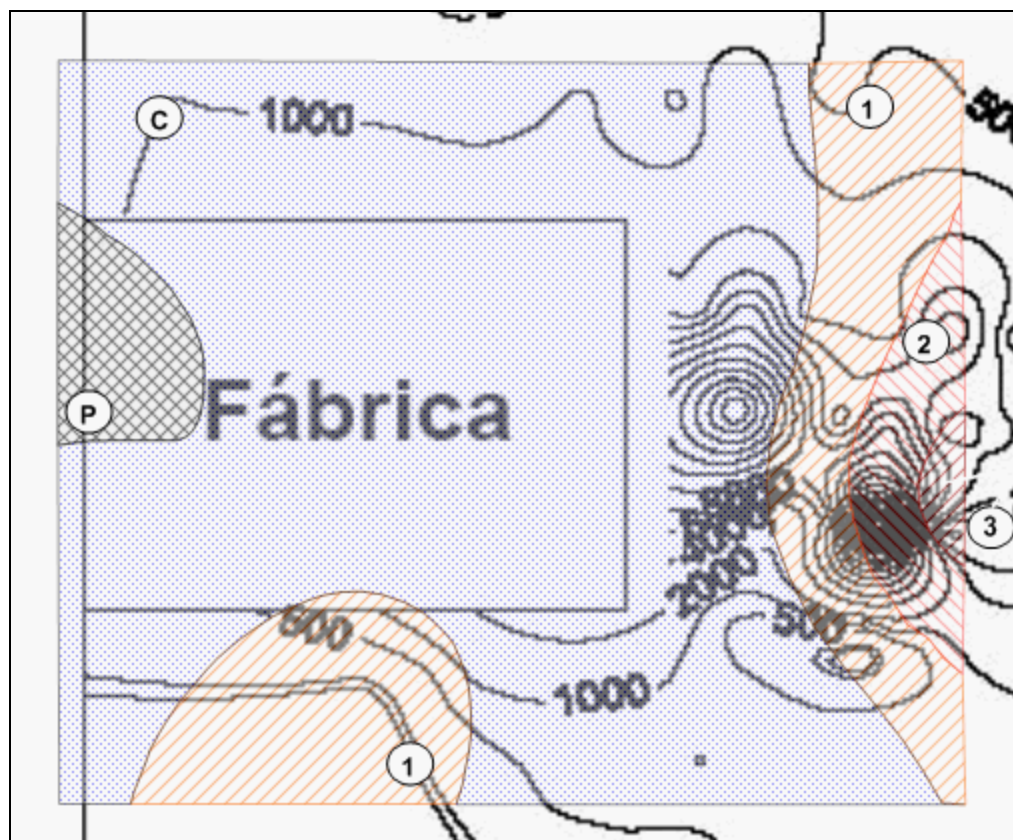


Fig. 8. Comparación de la zonificación del escenario de peligro por contaminación de metales pesados, y los resultados de mediciones del potencial redox, de la concentración del elemento plomo. Fuente resultados Redox: Rodríguez et al. (2011). Las isocóncidas representan las concentraciones calculadas a partir de los resultados de laboratorio y sus correlaciones con las mediciones del método REDOX.

Conclusiones

1. En general, se pudo determinar una zonificación de los escenarios de peligros por contaminación por metales pesados, destacándose la zona interior de los límites de la Empresa con valores por encima de los permisibles y una zona coincidente con el vertedero, con valores extremadamente altos por encima de los tres umbrales de contaminación,
2. En el área de estudio existen dos elementos que influyen en la dispersión de los metales. El primero de origen natural (erosión laminar o en sábana) y el segundo es propiciado por la acción antrópica.
3. La presencia y dispersión de metales pesados en el área de estudio, está condicionada por las malas prácticas ambientales de la Empresa.
4. Existen condiciones favorables en los suelos que han frenado la propagación de la contaminación de estos metales hacia las aguas; estos son:
 - a. El pH elevado en la solución de los suelos del área, disparada en algunos casos particulares por contaminación química con residuales de NaOH,
 - b. La alta capacidad de intercambio catiónico propia de estos suelos.

- c. La permanencia de una tupida siembra de césped dentro de la Planta la cual aporta materia orgánica en los horizontes superiores, favorable al incremento de cationes cambiabiles y a la retención de metales contaminantes del suelo.

Recomendaciones

1. Confeccionar la Red de Monitoreo para Suelos y Aguas en el área de influencia directa de la Empresa y su zona de influencia indirecta que incluya también puntos de muestreo hacia el norte del área, en dirección a la Presa y hacia el sur, al poblado.
2. Realizar estudios de detalle en las áreas delimitadas por los escenarios de peligro que incluyan los cuerpos de agua, los suelos, la vegetación, y la salud humana, especialmente a los trabajadores y a la población.
3. Fomentar la realización de proyectos sobre salud humana y medio ambiente en el área, así como también la realización de conferencias sobre el tema en los centros educacionales del municipio y en los centros enmarcados en los escenarios de peligro aquí delimitados,
4. Deben tomarse medidas para la protección inmediata de los suelos y las aguas superficiales y subterráneas, tales como el aporte sistemático y continuado de compost, humus de lombriz, y otras formas de materia orgánica apropiadas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar la valiosa contribución al equipo técnico de la Empresa, al Ing. Ernesto Rocamora Álvarez por la revisión crítica del manuscrito, al profesor Elmidio Estévez, de la Universidad de Pinar del Río y al Ing. Emilio Milián Rodríguez de Geominera Centro, por sus aportes en la concepción, diseño, análisis e interpretación de los datos.

Referencias bibliográficas

- Campos, M., Azcuy, E., Valdés, G. & Torres, T. 1998. Identificación y evaluación de impactos ambientales en la Presa Niña Bonita, Municipio Bauta. *III Congreso de Geología y Minería (GEOMIN'98)*, La Habana, Cuba, Soc. Cub. Geol., p. 176.
- Correa, G. & otros. 1998. Diagnóstico Ambiental Integral del Municipio Arroyo Naranjo [Inf. Cient. Téc.]. *Arch. Inst. Geol. y Paleont.*, La Habana, Cuba, 120 pp. *Colección CNIG*. (CNIG - Centro Nacional de Información Geológica).
- Cuevas-Ojeda, J. L., Gutiérrez-Pérez, B., Polo-González, B., Jaimez-Salgado, E., Núñez-Lafitte, M., Guerra-Oliva, I., Valdés-Hernández, M. G., *et al.* 2009. Actualización del Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Almendares - Vento, 2008 [Inf. Cient. Téc.]. *Arch. Inst. Geof. y Astron. e Inversiones Gamma S. A.*, La Habana, Cuba, 239 pp. *Colección SCT Actualización Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Almendares - Vento, 2008.* + 27 Anex. Gráf., 29 p y 1 Anex. Tabla, 14 pp.
- 2011. Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares-Vento. SIG y Multimedia. *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (IX Congreso Cubano de Geología – GEOLOGÍA'2011)*, La Habana, Cuba, 4-8 abril, Soc. Cub. Geol., GEO6-O8: 12 pp.
- 1999. Calidad del suelo. Método para la determinación de la erosión potencial de los suelos. La Habana, Cuba, *INN*, NC 36:9.
- 1999. Calidad del suelo. Requisitos generales para la toma de muestras de suelos. La Habana, Cuba, *INN*, NC 37, 7 pp.
- Kabata-Pendias, A. & Adriano, D. C. 1995. Trace Metals. Soil Amendments and Environmental Quality. *En: Rechcigl, J. E. (Ed.) Agricultural and Environment Series*. New York, CRC Press NY, 139-167 pp.
- López-Kramer, J. M. 2006. Mineralogía y Geoquímica Ambiental, Curso de Superación Profesional, 50 pp, *Inst. Geof. y Astron.*, La Habana, Cuba.
- López-Kramer, J. M., Gandarillas-Hevia, J., Acevedo-del-Monte, E. & Moreira-Martínez, J. 2006a. Mineralogía y Geoquímica: su efecto en los problemas ambientales, procesos tecnológicos, la minería y los desechos urbanos. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 7, 21-31, [En línea] Disponible: <<http://www.iga.cu/publicaciones/revista/ctye7-art3.html>>

- López-Kramer, J. M., Moreira, M. J., Vera, A., Pacheco, P. C. & Toujague-de-la-Rosa, R. 2006b. Mineralogía, Geoquímica y Medidas de Protección Ambiental en Yacimientos de Oro, Cuba. Revista. Universidad Ciencia y Tecnología. (UCT). ISSN: 1316-4821. Volumen 10. No 41, Pág. 301-306. Diciembre 2006. (Venezuela).
- Molerio, L. L. 1992. Técnicas estadísticas y de la teoría de la Información en el diseño y control de las redes de monitoreo de las aguas subterráneas en el carso [Inf. Cient. Téc.]. *INRH*, La Habana, 31 pp.
- Muñiz, O. (2008). *Los Microelementos en la Agricultura*, La Habana, Edit. AGRINFOR, 132 pp.
- Olivares, S. & De-la-Rosa, D. 2006. Distribución, Transporte y Bioacumulación del mercurio en el río Sagua La Grande [Inf. Cient. Téc.]. *Arch. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas*, La Habana, Cuba, 35 pp.
- 2009. Estimación del cumplimiento de las especificaciones sanitarias respecto a metales pesados en alimentos cultivados en la cercanía del vertedero de calle 100 de la Habana. *Arch. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas*, La Habana, Cuba, 56 pp.
- Norma Cubana NC 37. 1999. Calidad del suelo. Requisitos generales para la toma de muestras. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, 7 pp.
- Pedroso, I. I., Fundora, M. J., Jaimez, E., Guerra, M., González, I. & Gandarilla, J. 2007b. Zonación de la contaminación de los suelos por metales pesados en sectores de la cuenca del río Almendares según la cartografía magnética. *Cuadernos del Almendares*, 1 (1), 67-74.
- Pedroso, I. I., Fundora, M. J., Jaimez, E., Guerra, M., González, I., Gandarilla, J., Gutiérrez, B., et al. 2005a. Zonación de la contaminación de los suelos por metales pesados en zonas de la cuenca del río Almendares según la cartografía magnética [Inf. Result. Final]. *Arch. Inst. Geof. y Astron.*, La Habana, Cuba, FALTA LA CANTIDAD DE PAGINAS pp. *Colección Programa Ramal "Protección del Medio Ambiente Cubano y su Desarrollo Sostenible"*, Agencia de Medio Ambiente.
- 2005b. Cartografía magnética para el monitoreo de la contaminación por metales pesados. Aplicación en la cuenca del río Almendares. *Arch. Inst. Geof. y Astron.*, La Habana, Cuba, FALTA LA CANTIDAD DE PAGINAS pp. *Colección Programa Ramal "Protección del Medio Ambiente Cubano y su Desarrollo Sostenible"*, Agencia de Medio Ambiente.
- Pedroso, I. I., Fundora, M. J., Jaimez, E., Guerra, M., González, I., Pérez, B., Rossi, R., et al. 2007a. Resumen del diagnóstico de la cuenca Almendares-Vento. *Cuadernos del Almendares*, 1 (1), 9-31.
- Quintana-Puchol, R., Rodríguez, M. F., González, L. P., Fernández, M. E., Pérez, R. M. & Crespo, C. A. 2009. Tratamiento de residuales catalíticos envenenados para obtener materias primas útiles para diversas industrias [Inf. Final Proy.]. *Arch. Univ. Cen. de Las Villas "Marta Abreu"*, Villa Clara, Cuba, 25 pp. *Colección Programa Ramal "Protección del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible"*, Cod. 30904.
- Rocamora, E., López-Kramer, J. M., Rosario, K. D. & Peñalver, L. L. 2009. Contribución al conocimiento de los acuíferos cárlicos costeros en la región noreste de la provincia de La Habana. Caso de estudio Boca de Jaruco. *III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra – VIII Congreso de Geología, GEOCIENCIAS - GEOLOGÍA'2009*, La Habana, Cuba, Soc. Cub. Geol., GEO5-PO4. ISBN 978-959-7117-19-3
- Rodríguez, O., Pardo, M., Pérez, H. & Alfonso, W. 2011. Aplicación del Complejo Redox en el monitoreo de la contaminación con metales pesados en los suelos de la periferia de la Industria de baterías secas "YARA". *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (VI Congreso Cubano de Geofísica, GEOFISICA'2011 -Temas Especiales de Geofísica GEF3-CE1)*, La Habana, Cuba, 4-8 abril, Soc. Cub. Geol., 14. ISBN 978-959-7117-30-8
- Toujague-de-la-Rosa, R. 2001. Identificación y Caracterización de las fuentes de Arsénico en la Región de la Mina Delita, Isla de la Juventud. [Inf. Result.]. *Arch. Inst. Geof. y Astron. y Agencia de Medio Ambiente*, La Habana, Cuba, 67 pp. *Colección Prog. Ramal "Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible"*.

Acerca de los autores:

Jesús Manuel López Kramer: Doctor en Ciencias Geólogo Mineralógicas desde 1988, obtenido en el Instituto de los Yacimientos Minerales, Mineralogía, Petrografía y Geoquímica, IGEM, de Moscú, Academia de Ciencias de la antigua URSS. Investigador Titular en el departamento de Geología Ambiental Geofísica y Riesgos del IGA, AMA y del departamento de Yacimientos Minerales del IGP, MINEM. Profesor Asistente de la Universidad Agraria de San José de las Lajas. Miembro del Consejo Científico del IGA, Grupo de Expertos del MINEN y del Comité Técnico del Ámbito de la Información Geográfica de la ONEI.

Efrén José Jaimez Salgado. Licenciado en Geografía de la Universidad de la Habana, 1989. Experto en *Geografía de los Suelos, Edafología y Carsología*. En octubre de 2008, obtuvo el grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. En febrero de 2009, obtuvo la categoría científica de investigador auxiliar. En junio de 2012, profesor adjunto de la *Escuela de Hotelería y Turismo de La Habana*. En 2013, profesor auxiliar de la Universidad de la Habana. Ha realizado investigaciones científicas en todo el país y en la República de Ecuador; tiene 78 publicaciones científicas. Actualmente es coordinador del proyecto BASAL por el Instituto de Geofísica y Astronomía.

José L. Cuevas Ojeda. Graduado en Ingeniería Geofísica en el Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE), de La Habana (1977), Doctor en Ciencias Geofísicas por la Academia de Ciencias de Cuba (1996). Profesor Auxiliar (2010) del ISPJAE, donde imparte docencia de pregrado, ha dictado diferentes cursos de postgrado, diplomados y conferencias en universidades de Cuba y Nicaragua. Investigador Titular (1999) con treinta y ocho años de experiencia en la investigación científica, actualmente labora en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) de Cuba. Ha participado en más de setenta eventos científicos nacionales e internacionales y publicado cuarenta artículos científicos en revistas nacionales y extranjeras.

Bárbara Polo González. Técnico Superior de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, con veinte años de experiencia en la investigación científica en proyectos de geofísica, riesgos geólogo-geofísicos y tecnológicos asociados y en los servicios de consultoría ambiental. Ha impartido cursos de superación profesional. Ha publicado más de quince artículos científicos, participando como ponente en más de veinte eventos nacionales e internacionales. Actualmente se encuentra jubilada.